

OPENBAAR

High Tech Campus 21
5656 AE Eindhovenwww.tno.nl

T +31 88 866 54 43

TNO-rapport**Eindrapportage Rollaflex-project**

Datum	16-05-2022
Auteur(s)	Marc Kivits, Marc Koetse
Aantal pagina's	27
Aantal bijlagen	0
Oprachtgever	RVO
Projectnaam	Rollaflex
Projectnummer	060.41444



Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZK-subsidies, Top sector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO OPENBAAR

Inhoudsopgave

1	Gegevens project	3
1.1	Project nummer.....	3
1.2	Project titel	3
1.3	Penvoerder en medeaanvragers	3
1.4	Project periode	3
2	Inhoudelijk eindrapport	4
2.1	Samenvatting.....	4
2.2	Introductie.....	6
2.3	Doelstelling.....	7
2.4	Werkwijze.....	7
2.5	Resultaten A) van het project zelf : Deliverables	8
2.5.1	WP1: Productdefinitie, specificering en pakket van eisen (TNO)	8
2.5.2	WP2: Materiaal selectie, ontwikkeling en validatie (Yparex).....	11
2.5.3	WP3: Procesontwikkeling rollaminatie (Maan).....	16
2.5.4	WP4: Integratie en Demonstratie (TNO).....	21
2.5.5	WP5: Project management (TNO).....	26
2.6	Resultaten B) mogelijkheden voor spin off en vervolg activiteiten	26
2.7	Discussie	26
2.8	Conclusie en aanbevelingen	27

1 Gegevens project

1.1 Project nummer

Project nummer extern: TEUE319004

Project nummer intern: 060.41444

1.2 Project titel

Project titel: Rollaflex (roll-lamination of Flexible PV-semi-fabrics)

1.3 Penvoerder en medeaanvragers

Penvoerder en projectleider: TNO



Medeaanvragers: Duurzame Daksystemen, Yparex, Maan Group



1.4 Project periode

Project periode: 01-03-2020 tot 01-03-2022, is 2 jaar

2 Inhoudelijk eindrapport

2.1 Samenvatting

Binnen het Rollaflex-project is een proces ontwikkeld voor de kosteneffectieve fabricage van flexibele fotovoltaïsche (PV) halffabricaten en de integratie daarvan in dakbedekkingsmateriaal. Een cruciale stap daarvoor is om het proces geschikt te maken voor rollaminatie.

Het rol-lamineer proces geeft de vrijheid om in een continu proces grotere, in theorie eindeloze, lengten van PV modules te produceren. In het vacuümproces worden de afmetingen van de PV modules gelimiteerd door de grote van de machine. Huidige machines produceren tot maximaal 6 meter lange PV modules.

Bij aanvang van het Rollaflex project zijn de knelpunten geanalyseerd die kunnen optreden bij het vevangen van het huidige vacuümlamineerproces door een rollamineerproces en dit bij gebruik van dezelfde of vergelijkbare materialen. In WP1 zijn de specificaties van het eindproduct vastgesteld, deze zijn noodzakelijk om beide processen te kunnen beoordelen.

Uit de eerste proeven is gebleken dat de lijmlagen (encapsulant) zoals deze in het vacuümproces gebruikt worden niet compatibel zijn met het rollamineer proces. Er ontstaat delaminatie als gevolg van verminderde hechting en er zijn luchtbellens in het laminaat waargenomen.

Deze eerste resultaten hebben geleid tot het ontwikkelen van een hele serie nieuwe encapsulanten. Deze zijn geproduceerd en hiermee zijn verschillende proeven uitgevoerd met verschillende proces parameters zoals temperatuur, druk, snelheid.

De resultaten van de nieuwe encapsulanten zijn o.a. beoordeeld op:

- de kwaliteit van hechting door middel van trek- en kruip proeven.
- aanwezigheid van luchtbellens
- optische kwaliteit
- resultaten van versnelde levensduurtesten

Uit eindelijk is er een encapsulant geselecteerd die voldeed aan de gestelde specificaties. (WP2).

Deze encapsulant is meegenomen naar WP3 waar het rollamineer proces uitgebreider is bestudeerd.

De resultaten gaven voldoende vertrouwen in het rollamineer proces om functionele PV module te kunnen maken met langere lengten.

Er zijn 2 modules van 8.5 meter geproduceerd. Deze zijn overhandigd aan de project partner DDS die dit als halffabricaat in dakbedekkingsmateriaal geïntegreerd hebben. (Zie Figuur 1,2 en 3)

Concluderend heeft het Rollaflex project belangrijke stappen gezet (de haalbaarheid van rollaminatie) om uiteindelijk tot een geautomatiseerd en

geïntegreerd productie proces te komen voor PV-laminaten die als halffabricaten voor kosten effectieve PV-geïntegreerde producten ingezet gaan worden.



Figuur 1 : 8meter PV modules geïntegreerd op dakbedekkings materiaal



Figuur 2 : Klaar voor installatie op dak



Figuur 3 : geïnstalleerd op dak

2.2 Introductie

Het Rollaflex-project beoogt, zoals beschreven in het projectvoorstel: de ontwikkeling van een proces voor de fabricage van flexibele fotovoltaïsche (PV) halffabricaten en de integratie daarvan in dakbedekkingsmateriaal. Deze ontwikkeling volgt op een generieke wens van de industrie om op maat PV-geïntegreerde producten te kunnen maken om tot een kosten effectieve toepassing van zonne-energie in o.a. de gebouwde omgeving. Het halffabricaat bestaat uit slechts het minimum aan materialen om de PV functionaliteit te waarborgen en wordt in massa (grote lengtes, bijvoorbeeld in een “roll-to-roll” proces) geproduceerd. Vervolgens wordt het halffabricaat op maat gemaakt en verwerkt tot eindproduct.



Figuur 4 : voorbeeld van geïntegreerd zonnepanelen op een lichtgeconstrueerd dak

Het project richt zich in essentie op een 2-tal onderzoeksvragen:

- Hoe kan een halffabricaat met PV functionaliteit, met “oneindige lengte” worden gemaakt
- Hoe kan een halffabricaat op maat worden gemaakt en met behoud van PV functionaliteit worden geïntegreerd in een product (zoals dakbedekkingsmateriaal) (zie Figuur 4 : voorbeeld van geïntegreerd zonnepanelen)

De belangrijkste uitdaging voor het maken van grote lengten zonnepanelen is het ontwikkelen van een rol-lamineerproces dat een vergelijkbaar resultaat geeft als het algemeen gebruikte vacuüm lamineer proces. De interactie tussen materialen en proces wordt onderzocht met de nadruk op de eigenschappen van het encapsulant (inclusief recycleerbaarheid). Het onderzoek naar de integratie richt zich op het ontwerp van het halffabricaat en de op maat verwerking met een betrouwbare elektrische interface.

2.3 Doelstelling

Het doel van RollaFlex is om tot een 'proof of principle' (TRL4/5) te komen van de fabricage van een kosteneffectief flexibel PV-halffabricaat en de prefab integratie daarvan tot een dakbedekkingsmateriaal met PV-functionaliteit.

De volgende onderzoeksvragen worden hierbij beantwoord:

- Wat zijn de meest geschikte materialen (optimale stack) voor het halffabricaat (functie en duurzaamheid) het proces (robuustheid) en recycleerbaarheid (materiaaleigenschappen)
- Wat is het meest geschikte rol-lamineerproces om tot 'oneindige' halffabricaten te komen
- Wat is de optimale elektronische architectuur van het half fabricaat voor zowel maakbaarheid als integreerbaarheid. Hierbij worden ook zaken als schaduw tolerantie en eenvoudige elektrische interfacing geanalyseerd (zoals het eenvoudig kunnen plaatsen van een' junction box')

Uiteindelijk wordt het 'proof of principle' aangetoond door een aantal geïntegreerde producten van ca. 10 m te maken.

2.4 Werkwijze

De activiteiten in Rollaflex zijn onderverdeeld in een 4-tal werkpakketten

1. Productdefinitie, specificering en pakket van eisen (WP-leider TNO)
2. Materiaal selectie, ontwikkeling en validatie (WP-leider Yparex)
 - a. Materiaal selectie en validatie back en front sheet in combinatie met nieuw encapsulant en gekozen cel materiaal
 - b. Optimalisatie van encapsulant voor proces, PV performance, recyclebaarheid en hechting.
 - c. Validatie en testen op kleine schaal (Elektrisch en Damp heat test)
3. Ontwikkeling van het rollaminaarproces(WP-leider Maan)
 - a. Keuze van lamineermethode op basis van literatuur en ervaringen in het veld
 - b. Bepalen en optimalisatie van proces parameters
 - c. Exploratief onderzoek naar de mogelijkheid om encapsulant te extruderen i.p.v. mee lamineren
 - d. Realisatie van een test opstelling (<40 cm web breedte) met validatie van proefstukken tot 2m lengte
4. Integratie en demonstratie (WP-leider TNO)
 - a. Ontwerp van halffabricaat op maakbaarheid en gewenste elektrische eigenschappen en verwerkbaarheid, inclusief elektrische interface
 - b. Validatie van de half fabricaten op grote schaal
 - c. Integratie met dakbedekkingsmateriaal tot eindproduct

- d. Validatie van eindproduct in damp heat en temperatuur cycle testen

5. Projectmanagement (TNO)

2.5 Resultaten A) van het project zelf : Deliverables

Het eindresultaat van dit project is een proces dat de haalbaarheid aantoont dat flexibele PV-halfabricaten gemaakt kunnen worden middels een rollamineer proces en dat deze halfabricaten vervolgens kunnen worden geïntegreerd met dakbedekkingsmateriaal op een relevante schaal (>10m). Hieronder worden de resultaten van elk werkpakket beschreven.

2.5.1 **WP1: Productdefinitie, specificering en pakket van eisen (TNO)**

DDS heeft dankzij de jarenlange ervaring met het installeren van PV op licht geconstrueerde daken een goed beeld van het te ontwikkelen product. In dit werkpakket wordt deze wens uitgelijnd met de eisen die aan het halfabricaat, de materialen en het proces worden gesteld.

Het pakket van eisen geeft richting en zal dienen voor verificatie en validatie, gedurende het project.

2.5.1.1 *Wensen en eisen die gesteld worden door de gebruiker (DDS)*

1. Junction box.

De junction box die gebruikt wordt is UV-bestendig en kan in ieder geval gewoon aan de bovenkant worden geplaatst. De eis wordt voor nu bovenzijde.

Bij massaproductie kunnen we dan bekijken of we ook een variant willen met montage aan de onderzijde.

2. Hechting.

Er zijn geen specifieke hechtingseisen. Voorkeur heeft het om de lijm DP111 van Sika te gebruiken. DDS heeft hiermee ervaring bij het verlijmen van PV modules op dakbedekking.

Uiteraard worden er aan de garantie die de leverancier geeft op de prestaties van de lijm wel eisen gesteld (onverminderde hechting gedurende levensduur panelen, van minimaal, 25 jaar).

3. Brandwerendheid.

Het dakbedekkingsmateriaal (Evalon) voldoet ruimschoots aan de brandwerendheidseisen uit het bouwbesluit.

4. Levensduur.

Voor alle moderne panelen is, volgens de nu geldende normen, een levensduur van 25 jaar een eis.

5. End-of life.

Naast de eis om na de levensduur de dunne film te kunnen scheiden van de dakbaan zou het mooi zijn als ook de dunne film en encapsulant weer van elkaar gescheiden kunnen worden zodat er gescheiden afvalstromen ontstaan. Wellicht moet daarvoor de encapsulant weer zachter gemaakt kunnen worden.

6. Reiniging.

Normaal gesproken regenen de panelen schoon o.b.v. het afschot in het dak. Omdat dit afschot vaak maar 3% is, afhankelijk van de situatie ter plaatse, ook periodieke reiniging wenselijk, bijvoorbeeld vogelpoep, spooromgeving, etc.. Dat gebeurt dan met een hogedrukreiniger en milde zeep. Het bovenste laminaat moet daar dus tegen bestand zijn. Maar beloopbaarheid (m.u.v. naaldhakken) is ook een eis, dus waarschijnlijk dekt die eis automatisch de bestendigheid tegen een hogedrukreiniger af. Uiteraard wordt er met beleid schoongemaakt.

7. Baanbreedte.

De gebruikte baanbreedte is nu 1,20 m. Een bredere baan is i.v.m. winddruk en -zuiging niet persé aan te bevelen. Afhankelijk van de te verwachten belangstelling zullen we dus eerder kijken naar een smallere baan dan naar een bredere (bijv. 2 dunne film banen, 70 cm).

2.5.1.2 Wensen en eisen die gesteld worden voor de te gebruiken materialen

Voor het opstellen van de eisen voor de te gebruiken hebben we een onderscheid gemaakt in harde eisen, gestelde doelen en referenties. De eisen en wensen worden in tabel 1, 2 en 3 gespecificeerd.

Tabel 1: harde eisen

A	Property	Requirement	Standard to be used
1	Optical properties - transmission	Transmission > 90 %	ASTM D1003
2	UV cut off	350-375 nm	IEC 62788 or to be decided
3	Thickness (micron)	200 ± 20	- NA
4	Width (cm)	70 ± 5	- NA
5	Embossing	No	- NA
6	Interleave	Yes	- NA
7	Final testing: Prototype sample with PV device survives Accelerated Lifetime Tests / ALT (namely damp-heat 85-85 (DH), thermal cycling -40 to 85 (TC))	Pass	- NA (individual separate standards for each test)

Tabel 2: Gestelde doelen

B	Property	Requirement	Standard to be used
1	Adhesion to back sheet and front sheet (at 0h and also after ALT)	> 50 N/cm (180 degrees 1 mm/s)	ISO 8510-2 or to be decided
2	Surviving creep test (test method to be worked out)	Pass	to be decided

Tabel 3: Referenties

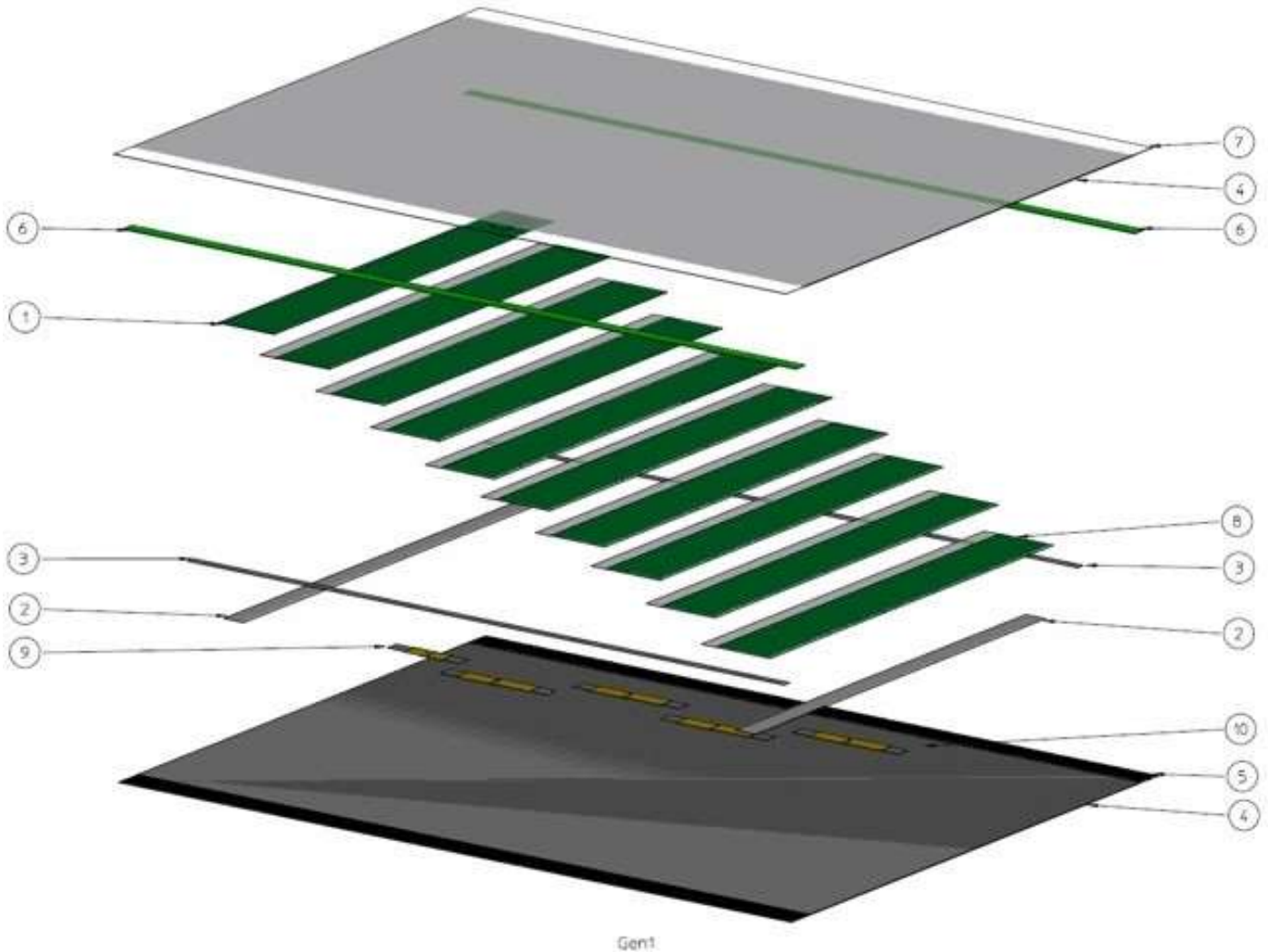
C	Property	Type	Values from reference	Standard from reference
1	Volume resistivity	Electrical	$>1 \times 10^{16}$ ohm-cm	ASTM D257
2	Dielectric Strength	Electrical	>20 kV/mm	ASTM D149
3	Moisture vapor transmission rate (MVTR)	Mechanical	< 5 g/m ² /day	ASTM F1249
4	Shrinkage	Mechanical	$< 5\%$	(unrestricted, 140°C for 4 min)
5	Water absorption	Mechanical	< 0.1 wt%	ASTM D570
6	Refractive index	Optical	1.48 ± 0.2 (?)	?
7	Yellowness index	Optical	to be defined	IEC 62788-1-4 or to be decided

2.5.2 WP2: Materiaal selectie, ontwikkeling en validatie (Yparex)

In dit werkpakket is gewerkt om tot een baseline materialen set voor halffabricaat te komen.

Hierbij is uitgegaan van de huidige baseline bij TNO/Solliance:

- Commerciële achter- en voorfolies
- MiaSolé zonnecel materiaal.



Figuur 5: Opbouw PV module

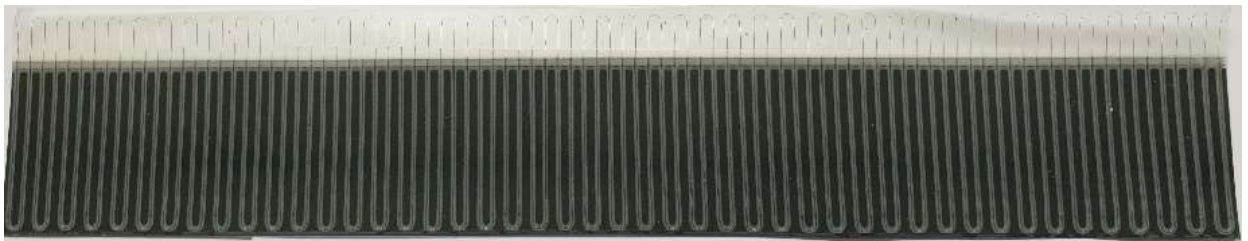
1. Zonnecel (type met achterzijde contact)
2. Stroomgeleider
3. Stroomgeleider
4. Encapsulant
5. Achterfolie
6. Rand afdichtings materiaal
7. Voorfolie
8. Zonnecel
9. Diode (type I)
10. Diode (type II)

Deze materialen hebben zich bewezen in een groot aantal verschillende projecten en zijn in voldoende hoeveelheden beschikbaar. Het ontwikkelen van een encapsulant is de belangrijkste activiteit in dit werkpakket.

Het belangrijkste aspect voor de ontwikkeling van de encapsulant is te weten met welke materialen en oppervlakken het moet adheren. Hiervoor zijn alle oppervlakken en de materialen geïdentificeerd middels een FTIR spectroscopie-analyse.

De uitkomsten hiervan zijn:

- Voorfolie: de binnenzijde welke in contact komt met encapsulant is PET. De buitenzijde is een fluoropolymer. Figuur 5: Opbouw PV module pos 7
- Achterfolie: de binnenzijde welke in contact komt met encapsulant is EVA, De buitenzijde is PET. Figuur 5: Opbouw PV module pos 5
- Zonnecel: De cel bestaat uit een metaal folie met daarop een transparante film .Figuur 5: Opbouw PV module pos 1
 - De zilverkleurige achterzijde van de metaalfolie vertoonde in de spectroscopie analyse geen aanwezigheid van een polymeer en kan aangenomen worden dat het oppervlak metallisch is.
 - De transparante film op de voorzijde en achterzijde van de cel vertoonde een spectrum van PE met poly (methyl acrylaat etheen)



Figuur 6: voorzijde PV cel



Figuur 7: achterzijde PV cel

Uit de oriënterende proeven is gebleken dat de lijmlagen (encapsulanten) zoals deze in het vacuümproces gebruikt worden niet compatibel zijn met het rollamineer proces.

Er ontstaat delaminatie als gevolg van verminderde hechting en er zijn luchtbelletjes in het laminaat waargenomen.

Op basis van deze eerste resultaten en de specificaties heeft Yparex een eerste set nieuwe encapsulanten ontwikkeld. (zie Tabel 4: Eerste set encapsulant films)

Deze zijn geproduceerd en getest onder verschillende omstandigheden op de lab-rollaminator bij Maan.

Tabel 4: Eerste set encapsulant films

Encapsulant film	Silane content	Crosslinker	EVA
1	*	*	Yes
2	*	**	Yes
3	*	***	Yes
4	*	****	Yes
5	**	****	Yes
6	**	****	No

Hiermee zijn verschillende proeven uitgevoerd met verschillende proces parameters zoals o.a. temperatuur, druk, snelheid.

Al deze testen zijn uitgevoerd op de lab-rollaminator welke ontwikkeld en gerealiseerd is door Maan. Maan en TNO beschikten over eenzelfde unit zodat de testen die door beide zijn uitgevoerd vergeleken konden worden en reproduceerbaar waren. Zie Figuur 8: lab-rollaminator



Figuur 8: lab-rollaminator

De resultaten van de nieuwe encapsulanten zijn o.a. beoordeeld op:

- de kwaliteit van hechting door middel van trek- en kruip proeven.
- aanwezigheid van luchtbelletjes
- optische kwaliteit
- resultaten van versnelde levensduurtesten

Naar aanleiding van deze resultaten is de conclusie getrokken dat in een encapsulant, met de eigenschap om te cross-linken (verknopen van moleculen) luchtbelletjes ontstaan. Een encapsulant (nr.6) zonder deze eigenschap vertoonde dit gedrag niet bij deze eerste resultaten.

Omdat de prestaties van een encapsulant zonder cross-link eigenschappen

voldoende goed zijn en omdat dit voordelen heeft voor de recycle-baarheid is er gekozen om door te gaan met encapsulanten zonder cross-link eigenschappen.

Een andere belangrijke waarneming is dat de viscositeit van de encapsulant sterk van belang is op het totale proces. De viscositeit heeft vooral invloed op het gedrag van de PV-cellen die in het laminaat zitten, deze gaan “drijven” als viscositeit te hoog is en de encapsulant wordt uit het laminaat gedrukt.

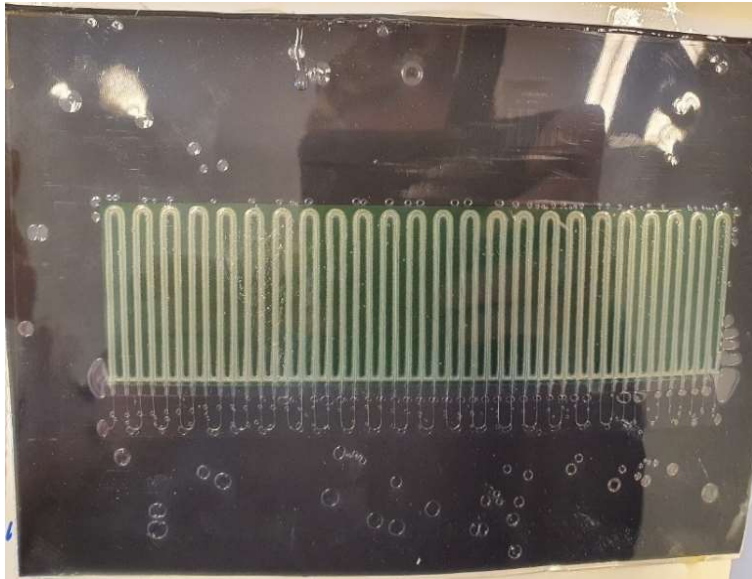
Op basis van deze resultaten en met name het best presterende encapsulant, zijn er een 4-tal encapsulanten doorontwikkeld. Nu zonder cross-linker en met variërende viscositeit. Zie Tabel 5 films 6 t/m10

Tabel 5:

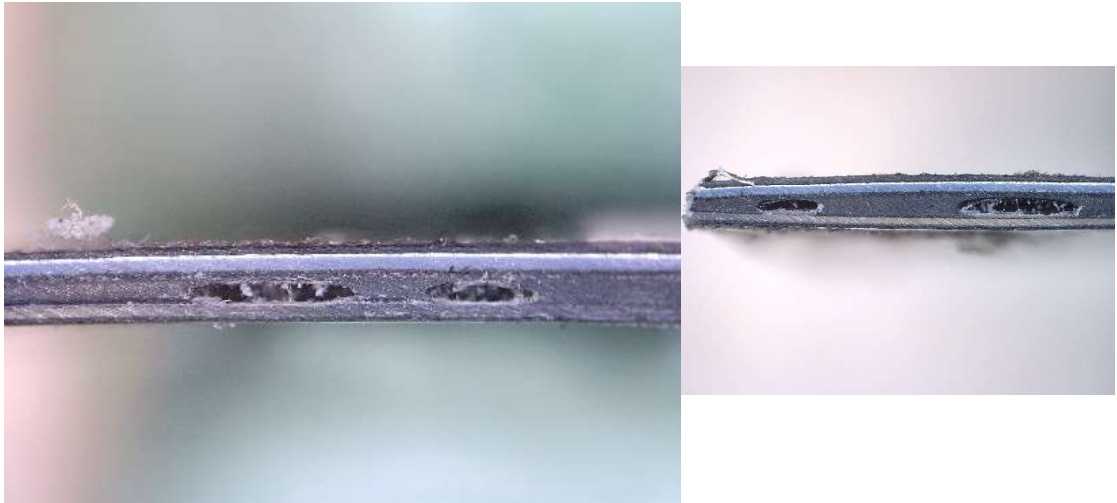
Encapsulant film	Silane content	Crosslinker	EVA	MFI (g/10 min @190@2,16)
1	*	*	Yes	20
2	*	**	Yes	20
3	*	***	Yes	20
4	*	****	Yes	20
5	**	****	Yes	20
6	**	****	No	20
7	**	No	No	20
8	**	No	No	10
9	**	No	No	5
10	*	No	No	20

Deze 4 nieuwe encapsulanten zijn uitvoerig getest en beoordeeld. Ze presteren op gebied van hechting wisselend maar voldoen wel aan de opgegeven specificaties. Ondanks de resultaten van de voorgaande testen zien we bij allen dat er, na de kruiptesten, toch luchtbellens ontstaan. (Zie Figuur 9: luchtbellens in laminaat en Figuur 10: dwarsdoorsnede luchtbel)

Op basis van de gewenste viscositeit is er een keuze gemaakt, met één encapsulant wordt er verder gegaan en wordt het probleem van het ontstaan van luchtbellens verder onderzocht.



Figuur 9: luchtbellen in laminaat



Figuur 10: dwarsdoorsnede luchtbel

Om meer inzicht te krijgen in de vorming van bellen in het laminaat wordt de invloed van alle proces parameters onderzocht.

Vanaf hier worden de werkzaamheden in WP2 in combinatie met werkzaamheden in WP3 uitgevoerd

2.5.3 **WP3: Procesontwikkeling rollaminatie (Maan)**

Voor de ontwikkeling een goed en stabiel proces is gekeken naar:

- Materiaal (zie wp2)
- Machine (zo dicht mogelijk bij de Mass Customization-line die on opbouw is)
- Parameters (goed proces/goed product)

Hierbij is uitgegaan van de stack zoals in detail beschreven zie Figuur 5: Opbouw PV module

De twee belangrijkste parameters zijn

- temperatuur
- druk

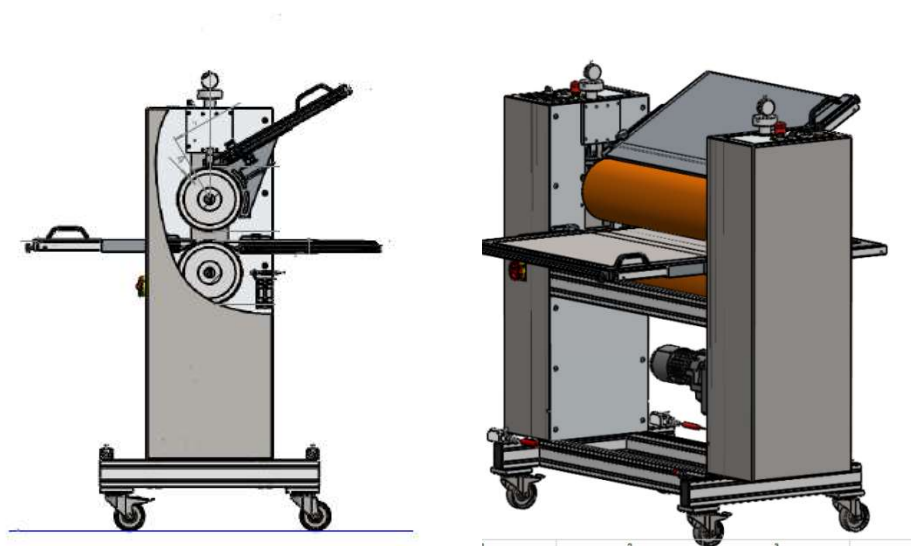
Voor dit alles is een grote hoeveelheid experimenten uitgevoerd.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen en resultaten besproken met betrekking tot de volgende aspecten.

1. machine
2. het begrijpen van de temperatuur profielen
3. De invloed van preheating
4. het begrijpen van de druk profielen
5. De maken van het laminaat van >6m (proof of concept)

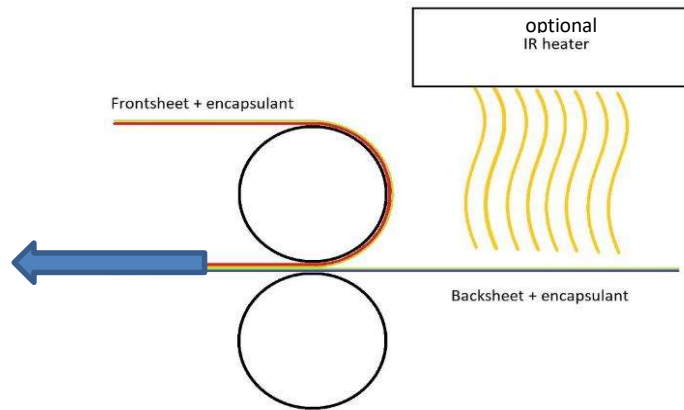
1.Machine:

Alle samples voor materiaal- en proces onderzoek zijn geproduceerd op de Maan rollaminator.



Figuur 11: Maan rol laminator

Het rollamineer proces ziet er als volgt uit:



Figuur 12: rollamineer schema

De parameters waar mee gevarieerd kan worden in het rol lamineer-proces zijn:

- Snelheid
- Rol druk
- Rol temperatuur
- Voor verwarming

2. Temperatuur profielen:

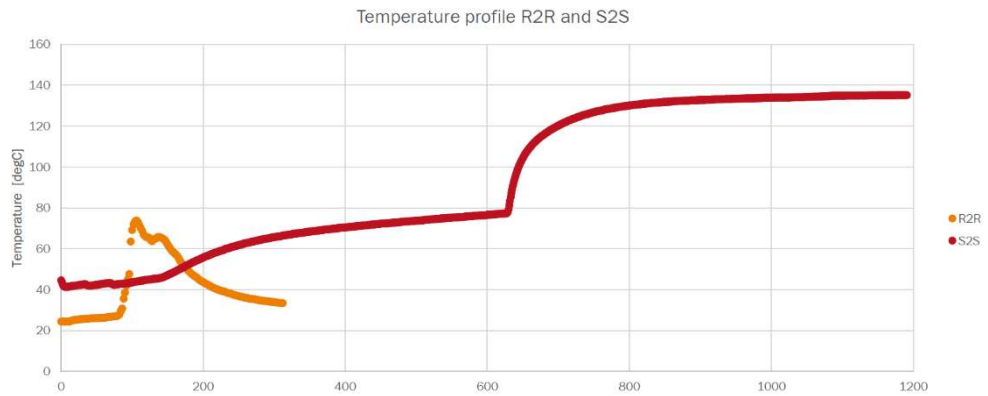
Om een goed beeld te krijgen, wat de invloeden van deze parameters zijn en welke afhankelijkheden er zijn, zijn er metingen verricht waarmee het temperatuur verloop op verschillende plaatsen in het laminaat is bepaald.

Voor goede hechting tussen de diverse oppervlakken is het van belang dat er een zo uniform mogelijke temperatuur verdeling is en dat de minimaal gewenste temperatuur overal bereikt wordt. Dit ter voorkoming van delaminatie.

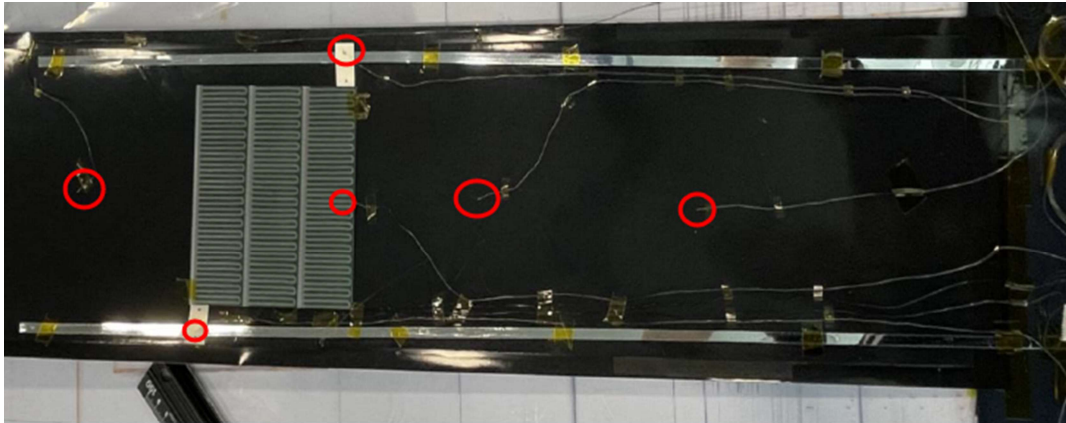


Figuur 13: zichtbare delaminatie

Om het temperatuur – tijd verloop voor het vacuüm lamineer proces (S2S en het rollamineer proces (R2R) in beeld te brengen is een temperatuurmeting uitgevoerd door middel van het plaatsen van thermokoppels in het laminaat terwijl deze door de lamineer machine wordt gevoerd en tijdens het vacuumeer proces. In het vacuumeer proces is de cyclus tijd vastgesteld op ca. 15min. De resultaten worden gepresenteerd in Figuur 14: temperatuur profiel R2R en S2S

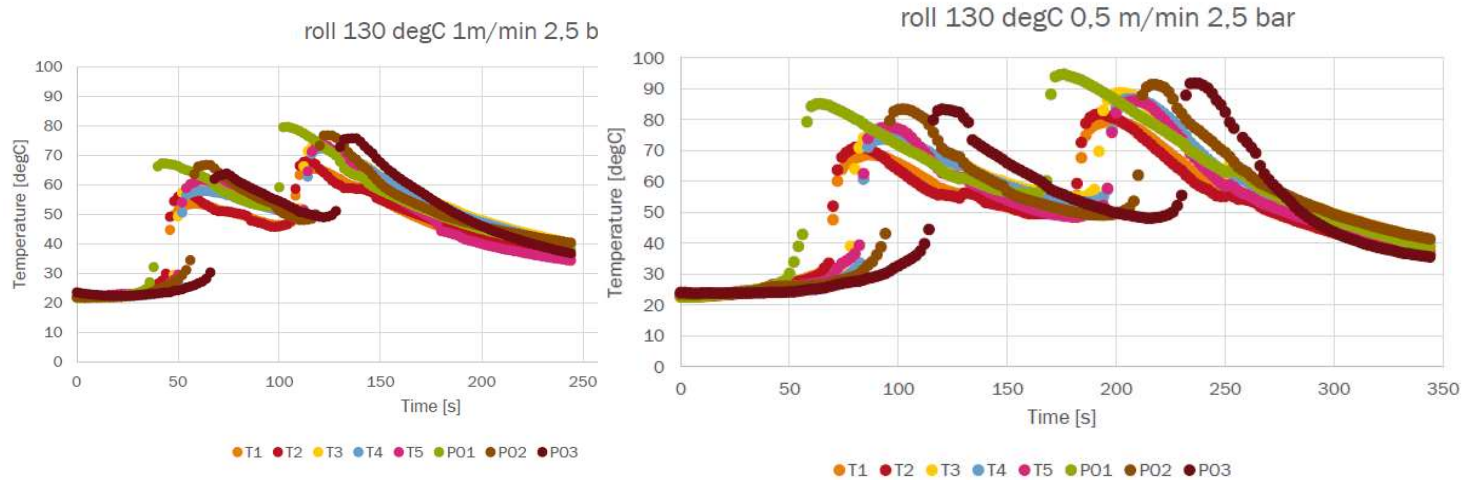


Figuur 14: temperatuur profiel R2R en S2S



Figuur 15 : Locaties thermokoppels

In het rollamineer proces is de cyclus tijd afhankelijk van de snelheid van doorvoeren. Het temperatuur-tijd diagram is voor verschillende snelheden opgesteld. Zie figuur 16 en 17



Figuur 16: temp-tijd verloop R2R

Figuur 17: temp-tijd verloop @ 0,5m/min

3. Invloed van voor-verwarming

Uit de temperatuur-tijd diagrammen is naar voren gekomen dat bij een gewenste snelheid van het rollamineer proces 0,5-1 m/min een niet voldoende hoge temperatuur in het laminaat wordt bereikt om de juiste verwerkingstemperatuur te behalen voor de diverse componenten.

Er is onderzocht welke invloed er met een voor-verwarming (zie optie in Figuur 12: rollamineer schema) uitgeoefend kan worden op te maximum te behalen temperatuur. Hiermee is bevestigd dat met infrarood lampen meer warmte ingebracht kan worden en dat de maximaal te bereiken piek-temperatuur tussen de rollen hoger wordt.

4. Invloeden van druk

In het vacuüm lamineer proces wordt een gelijkmatige druk van 1 bar (-> 0,1 N/mm²) voor ca. 5min aangebracht.

In het rol lamineer proces wordt het laminaat slechts kortstondig in een lijn-contact aangedrukt.

Belangrijke aspecten die hier een rol spelen voor het bepalen van benodigde- of toelaatbare druk zijn:

- Topologie van de opgebouwde componenten in het laminaat
- Het volledig verdrijven van de lucht in het laminaat.
- Weerstand die het laminaat ondervindt tussen de walsen, deze hangt samen met de druk op de walsen en kan interne spanningen in het eind laminaat veroorzaken wat leidt tot sterk vervormde eind producten.
- Gevoeligheid voor beschadigen van de gebruikte materialen

5. Het maken van een proof of concept

Het doel van het vervangen van het vacumeer proces door een rollamineer proces is om een effectiever continu roll-to-roll productie proces te krijgen waarmee in theorie ook oneindige afmetingen gemaakt kunnen worden.

De middelen voor het plaatsen van alle PV componenten in een continu proces zijn ten tijde van het Rollaflex project nog niet voorhanden. Om toch aan de

deliverables van WP4 te kunnen voldoen is er eerst een werkwijze bedacht om functionele langere PV module te kunnen maken en hiermee is een eerste proof of concept gemaakt. Figuur 18: proof of concept



Figuur 18: proof of concept

Aan het onderzoek naar het inline extruderen van encapsulanten zijn we niet aan toegekomen omdat de werkzaamheden voor het ontwikkelen van een encapsulant folie alle aandacht heeft gevraagd.

2.5.4 WP4: Integratie en Demonstratie (TNO)

Elektrische architectuur

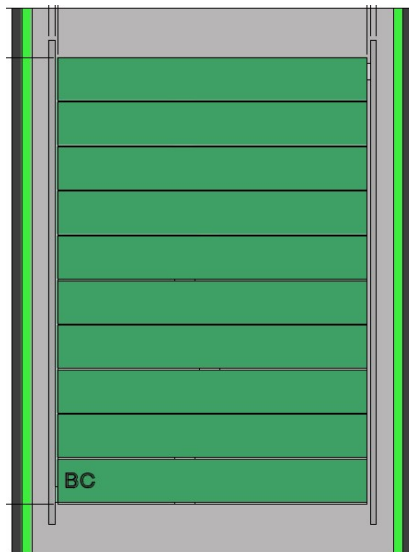
Voor integratie van PV modules op grote schaal is het van belang om dimensies van modules vrij te kunnen kiezen. Ook de elektrische eigenschappen van de PV modules moeten op een klant wens afgestemd kunnen worden.

Iedere PV-cel levert een gespecificeerde spanning en stroomsterkte. De gebruikte PV cellen kunnen vanwege het ontwerp naar wens op lengte ingekort worden. De commercieel verkrijgbare Miasolé cellen hebben standaard een lengte van 312mm. Door deze in lengte in te korten zal de stroomsterkte lineair met de lengte afnemen.

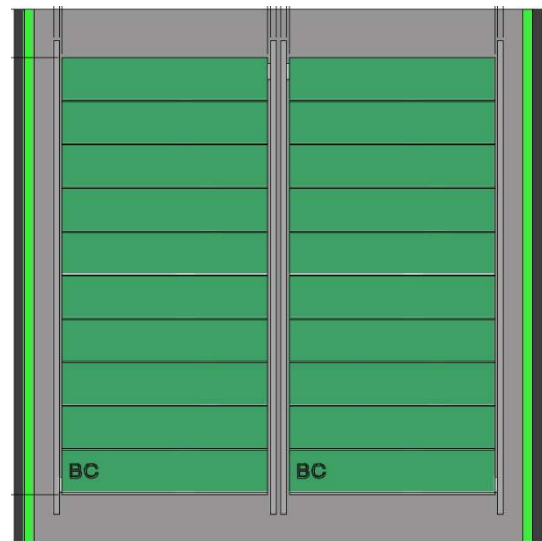
Elke PV cell levert een specifiek spanning welke onafhankelijk is van de lengte. Door de PV cellen in serie te verbinden bouwt dit voltage lineair op met het aantal cellen.

Eén of meerdere series van dezelfde afmetingen kunnen parallel verbonden worden. Hiermee kan het op het stroomsterkte van de module gestuurd worden.

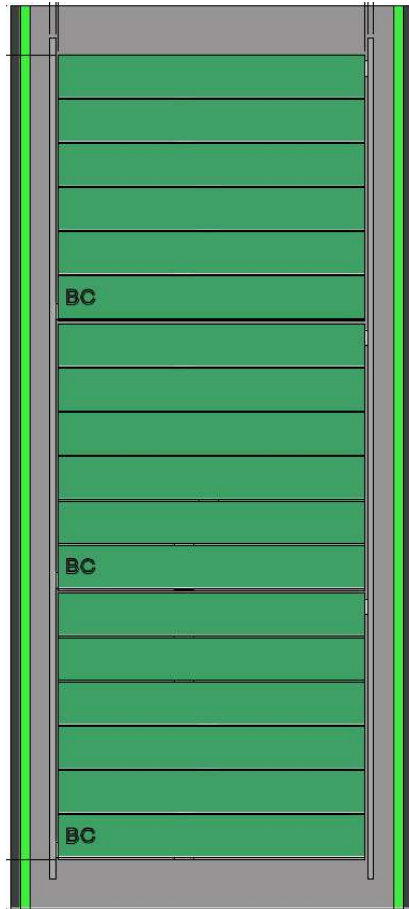
Met deze kennis zijn er een 4-tal designs bedacht. Deze design zijn parametrisch en kunnen naar wens in elke afmeting en elektrische eigenschap uitgevoerd worden.



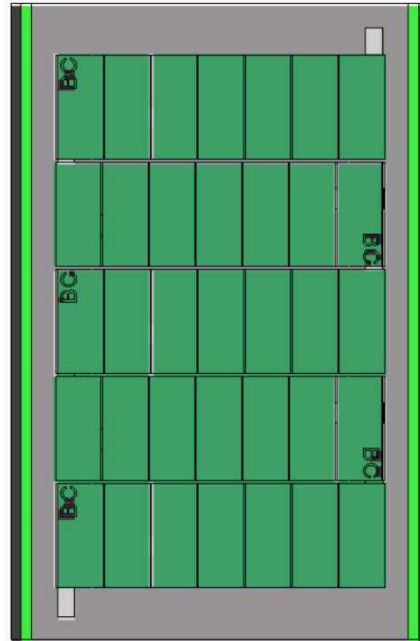
Figuur 19: ontwerp 1, één rij, één serie



Figuur 20: ontwerp 2, meerdere rijen, enkele series



Figuur 2: ontwerp 3, meerdere rijen,
meerdere series



Figuur 22: ontwerp 4, één serie

(BC in de figuren is een indicatie dat het een aangepaste cel waarbij het voorzijde-
contact van de cel naar de achterzijde is gebracht)

Integratie met dakdekkingsmateriaal:

Er zijn zowel in Nederland bij DDS als in Duitsland bij de fabrikant van de dakbedekking (Alwitra) testen gedaan voor hechting van PV module op dakbedekking. Deze zijn uitgevoerd met de baseline achterfolie (Krempel) op Evalon met de lijm Sikaflex SD111. Deze lijm is geselecteerd na proeven en op basis van de ervaring die DDS heeft met vergelijkbare materiaaltoepassingen. De Sikaflex is aangebracht in lengterichting met 5 rupsen per meter breedte. De proefstukken zijn 3 maanden beproefd onder diverse weeromstandigheden, in een klimaatkamer en volledig ondergedompeld in water. De resultaten van deze testen zijn positief bevonden (geen verminderde hechting en geen aantasting van het Evalon dakmembraan) en hiermee gekwalificeerd. Het dakdekkingsmateriaal Evalon voldoet aan de eis om 1000 V doorslagspanning te weerstaan. Tijdens de looptijd van dit project is DDS er in geslaagd om dit gecertificeerd te krijgen volgens RTI/IEC 61730.\

Realisatie half fabricaat:

Voor realisatie van het uiteindelijke product hebben TNO en Maan nauw samengewerkt. Om met de beschikbare productie middelen een opstelling te maken zodat de benodigde PV materialen (cellen, stroomgeleiders, geleidende lijm etc.), de folies en de encapsulant op juiste manier gepositioneerd kon worden was een hele uitdaging.



Figuur 23: Productie van 8 m module



Figuur24: voorbereiding 8 m module

Installatie en functionaliteitstest

Omdat er geen analyse apparatuur voorhanden is voor deze afmeting van de gemaakte modules is een eerste functionaliteitstest gedaan in de buitenlucht met zonlicht. Zie Figuur 25: Functionaliteitstest



Figuur 25: Functionaliteitstest van de 8 meter modules in de buitenlucht

Beide modules zijn functioneel en prestatie is naar verwachting. Er zijn nog geen duurzaamheidstesten op zijn uitgevoerd.

Nadat deze modules geïntegreerd zijn door DDS in de dakbedekking en geïnstalleerd zullen deze gemonitord worden op prestatie en duurzaamheid.

De dakbedekking is door DDS geïntegreerd in de dakbedekking.

Bij het gereed komen van deze eindrapportage zijn de panelen op het dak bij DDS gemonteerd maar omdat er vanwege enorme drukte in de installatie branch nog geen capaciteit is is deze nog niet aangesloten. Dakbedekking met geïntegreerde panelen en elektrische installatie staan klaar. Zie Figuur 26:



Figuur 26: Integratie van de 8 m modules met Evalon dakbedekkingsmateriaal

2.5.5 **WP5: Project management (TNO)**

Het project is gestart met een kick-off meeting en gedurende het project zijn er om de 3 maanden consortiummeetings geweest. Alle aantekeningen en afspraken zijn gedeeld middels notulen. In de 2 jarige looptijd van het project is er één RVO jaarlijkse voortgang gerapporteerd 15-3-2021. De laatste afsluitende consortium meeting is gehouden op 17-3-2022 waar concept eindrapportage is besproken en er mogelijkheid is geweest om zaken aan te vullen of herzien.

In december 2020 is er een artikel verschenen in het Solarmagazine met presentatie en toelichting op het Rollaflex project



Alle administratie is gedeeld middels een centraal SharePoint voor alle consortium deelnemers.

Er zijn geen patenten vastgelegd

Er is een eindrapportage document opgesteld in het Nederlands welke in overleg met alle consortium leden openbaar gemaakt mag worden.

2.6 **Resultaten B) mogelijkheden voor spin off en vervolg activiteiten**

TNO bekijkt of dit moment samen met imec de haalbaarheid van de oprichting van een spin-off die op basis van R2R-laminatie op maat gemaakte laminaten gaat leveren aan producenten van o.a. bouwdeelen. De verwachting is dat deze spin-off medio 2022 zal worden opgericht.

2.7 **Discussie**

De focus van het Rollaflex project heeft voornamelijk gelegen op het ontwikkelen van een geschikt encapsulant. De belangrijkste parameters die zijn geoptimaliseerd zijn de hechting, en het vloeigedrag. Met name dat laatste is nogal anders bij een rol-laminatie vergeleken met een vacuüm-laminatie. Er is een encapsulant ontwikkeld waarmee het mogelijk bleek functionele pv-laminaten te fabriceren van de gewenste lengte. Bij de initiële duurtesten, met name de kruiptest bleek dat er bel vorming plaatsvond er is uitvoerig naar de oorzaak van

dit fenomeen gezocht, maar er is nog geen eenduidig antwoord. Dit onderzoek zal buiten dit project worden voortgezet omdat het cruciaal is voor het verkrijgen van stabiele laminaten.

Er zijn uiteindelijk een 2-tal laminaten gemaakt waarbij een tweetal oplegstrategieën zijn getest: 1) werken met prelaminaten (voor gebruik bij stand-alone rol-laminatoren) en 2) direct opleggen van cellen (als simulatie van de in aanbouw zijnde mass-customisation lijn). Beide strategieën bleken succesvol. Hierbij moet worden opgemerkt dat er nog geen uitgebreide duurtesten zijn uitgevoerd. Ook dit is onderdeel van toekomstig onderzoek.

Voor de integratie met het Evalon dakmateriaal is een geschikte lijm gevonden die duurzaam en betrouwbare resultaten geeft. De geïntegreerde dakbaan wordt binnenkort op een dak geïnstalleerd en door partner DDS gemonitord.

De resultaten van dit project hebben in belangrijke mate bijgedragen aan het vertrouwen dat de partners hebben in het gebruik van rol-laminatie voor de fabricage van PV-laminaten, de ontwikkelde laminatoren en materialen zullen dan ook worden geïmplementeerd op de in aanbouw zijnde mass-customisation lijn. Het project laat zien dat productontwikkeling onlosmakelijk is verbonden met materiaal-, equipment en vooral procesontwikkeling.

Opgemerkt moet worden dat de rol-laminatie slechts één stap van vele is om tot een geïntegreerde en geautomatiseerde productie van PV-halfproducten te komen. Deze worden in huidige en toekomstige projecten verder onderzocht en ontwikkeld.

2.8 Conclusie en aanbevelingen

In het Rollaflex project is er een goed inzicht gekregen welke aspecten er allemaal van belang zijn wanneer we in het productieproces, van flexibele PV-laminaten, het vacuümproces willen vervangen door een rol-lamineerproces.

In dit project was het niet mogelijk om al deze aspecten te onderzoeken en er is daarom gefocust op de ontwikkeling van een compatibele encapsulant.

In de ontwikkeling van de encapsulant is er door het testen en de verschillende analyses veel kennis opgedaan van het rol-lamineer proces met dunne film PV cellen. Een van de resultaten van dit project is een encapsulant welke aan de fysieke eigenschappen voldoet zoals deze vooraf zijn opgesteld. Echter is er nog het fenomeen van het ontstaan van luchtbellen wanneer het laminaat aan een temperatuur van 100°C wordt blootgesteld. Hier is een oplossing voor gevonden, het kan voorkomen worden door de achterlaag en toplaag een warmte behandeling te geven voorafgaand aan het lamineer proces. Een onomstotelijke bewijsvoering voor de oorzaak is nog niet gevonden. Dit onderzoek moet na het Rollaflex project voortgezet worden.

Een tweede belangrijk resultaat is de realisatie van een tweetal functionele pv-laminaten met een lengte van 8 meter die geïntegreerd zijn met Evalon dakbedekkingsmateriaal. Deze worden binnenkort op een dak gemonteerd en gemonitord.

Binnen TNO wordt gewerkt aan het programma Mass Customisation waarin een productielijn met het rol-lamineer proces wordt gerealiseerd. Alle aspecten gerelateerd aan het rol-lamineren, die niet binnen in het Rollaflex project onderzocht zijn, zullen in vervolgprojecten opgepakt gaan worden. Hierbij is te denken aan additionele componenten en materialen zoals bypass diodes, tabbing

materiaal, geleidende lijmen, etc. Ook het geautomatiseerd opleggen van die componenten is in dit project niet aan bod gekomen. Ook de betrouwbaarheid en duurzaamheid van de PV-laminaten die met dit nieuwe proces geproduceerd gaan worden is heel belangrijk aspect dat verder onderzoek behoeft.

Concluderend heeft het Rollaflex project heel belangrijke stappen gezet (de haalbaarheid van rol-laminatie) om uiteindelijk tot een geautomatiseerd en geïntegreerd productie proces te komen voor PV-laminaten die als halffabricaten voor kosten effectieve PV-geïntegreerde producten in gezet gaan worden.

Contactpersonen voor meer informatie

Marc Koetse

TNO Solar Technology and Applications

Marc.koetse@tno.nl

Marc Kivits

TNO Solar Technology and Applications

Marc.kivits@tno.nl

Meer exemplaren van dit rapport zijn verkrijgbaar via deze contacten